

П.І. Огородніковд-р техн. наук
МНТУ**В.М. Світлицький**д-р техн. наук
ПАТ «Укргазвидобування»**В.І. Гоголь**

МНТУ

Деякі питання експлуатаційної надійності бурильної колони та її елементів у процесі будівництва свердловини

УДК 622.24.002.5

У статті розглянуто ефективність функціонування технологічного процесу поглиблення свердловини на основі ймовірних показників буріння і стану елементів бурильної колони. Приведено результати експериментального буріння із записом вібрацій, які використані для визначення нормального режиму роботи бурильної колони та її елементів.

В статье рассмотрена эффективность функционирования технологического процесса углубления скважины на основе возможных показателей бурения и состояния элементов буровой колонны. Приведены результаты экспериментального бурения с записью вибраций, которые использованы для определения нормального режима работы буровой колонны и ее элементов.

The paper considers operational efficiency of the well deepening procedure based on the probable drilling performance and the state of drill string components. The results of the pilot drilling are shown with a record of vibrations, which are used to determine the normal operating conditions of the drill string and its components.

Серед причин малої довговічності елементів бурильної колони, особливо породоруйнівного інструменту, можемо виділити специфіку умов буріння нафтових і газових свердловин. Саме тому елементи бурильної колони повинні мати велику надійність і оптимальну довговічність. Кожен зайвий спуск-підйом потребує економічних затрат. Таким чином, підвищення проходки на долото та збільшення або збереження механічної швидкості дає можливість знизити економічні затрати на проводку свердловини. Збільшення показників роботи долота залежить не тільки від удосконалення конструкції долота, але від зниження твердої фази у промивальній рідині та підбору її оптимальної густини. Ймовірність безвідмовної роботи бурильної колони та її елементів тісно пов'язана з урахуванням міцності під дією статичних і динамічних навантажень під час взаємодії долота з вибоєм.

Визначальним критерієм технологічної безпеки бурильної колони та її елементів є її надійність під час проводки свердловини в конкретних геолого-технічних умовах, що є також одним із основних показників якості будь-якої конструкції (механічної системи). Саме завдяки

надійності бурильної колони можливе виконання заданих функцій поглиблення вибою та збереження упродовж будівництва свердловини її експлуатаційних властивостей.

Бурильна колона складається з ряду секцій, які утворюють послідовну механічну систему, виконану з бурильних і обважнених труб, у нижній частині якої закріплено породоруйнівний елемент, вибійний двигун та опорні елементи. У верхній частині – ротор і його привід, талева система (підвіска) та рухомі маси – крйок, вертлюг, рухомі блоки.

Необхідно зазначити, що проблема надійності бурильної колони та її елементів розглядалася тільки з боку формування нормативних властивостей її конструкції за кінцевими експлуатаційними критеріями та кількісної оцінки таких властивостей за поданими конструктивними і технологічними показниками, у тому числі вихідними показниками буріння. У цьому випадку математичним апаратом аналізу є статистична теорія ймовірності, яка використовує як інформаційну базу ретроспективні відомості про відробку доліт та інших елементів колони у різних геолого-технічних умовах.

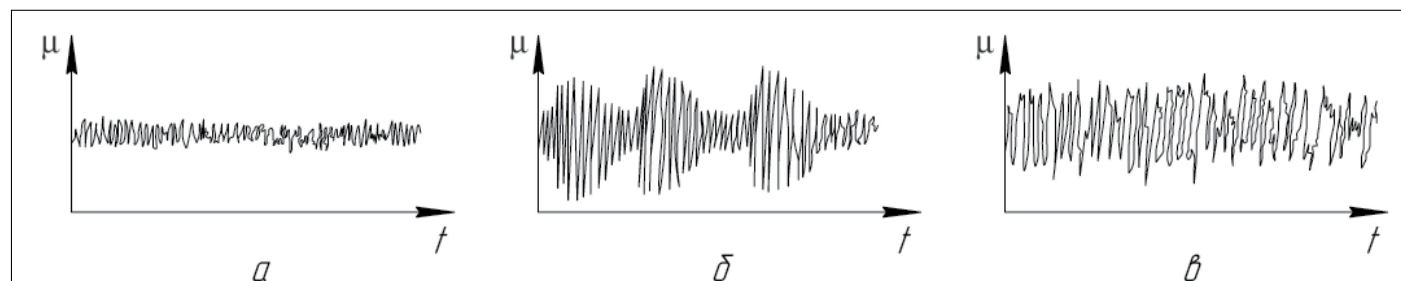


Рис. 1. Осцилограми зміни сили тертя в часі, які відповідають різним значенням $\mu = \varphi(P)$: а – нормальний режим роботи; б – скріплювання першого роду; в – скріплювання другого роду

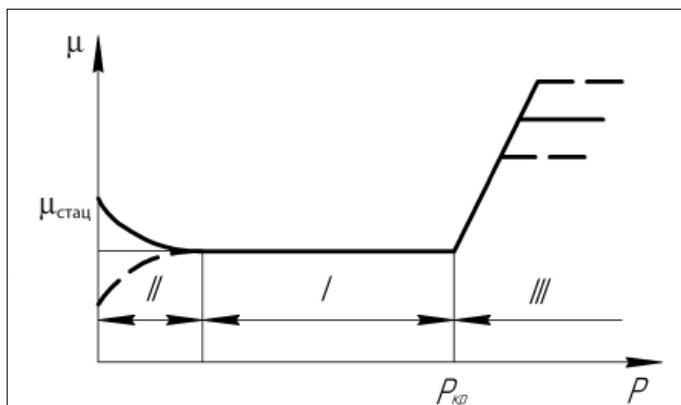


Рис. 2. Графік залежності коефіцієнта тертя від нормального навантаження

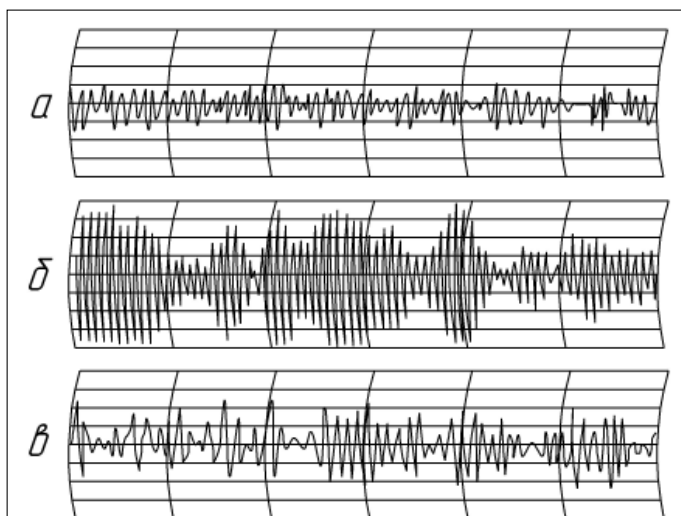


Рис. 3. Осцилограми зміни динамічної складової верху бурильної колони під час буріння турбобуром А9Ш (вибій 1200 м, $P_{ос} = 150$ кН): а – 0–30 Гц; б – 30–70 Гц; в – 70–ВК Гц

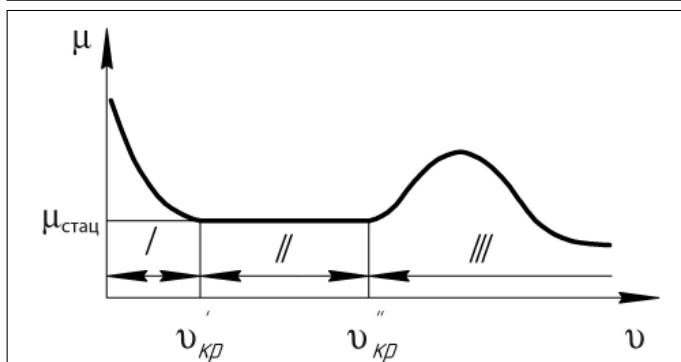


Рис. 4. Графік залежності коефіцієнта тертя від швидкості ковзання

Статистика відробки доліт, розширювачів, різбових з'єднань та інших елементів бурильної колони, а також відмова з інших геолого-технічних причин є основним джерелом інформації для оцінки надійності елементів бурильної колони в процесі поглиблення вибою. Також вона

є сигналом зворотного зв'язку про стан елементів колони і дає уявлення про те, наскільки режимні параметри, спосіб буріння, умови промивання свердловини забезпечили потрібні показники надійності. У такій методологічній постановці надійність елементів бурильної колони є категорією слабкокерованою, це стосується й інших трубопровідних систем [1]. Необхідно зазначити, що в подальшому визначення параметрів надійності буде базуватися на реалізації системного підходу до проблеми, яка буде ґрунтуватися на комплексному вирішенні завдань надійності елементів бурильної колони та передусім породоруйнівного елемента – долота для підвищення показників буріння й зниження аварійності.

Для об'єктивної оцінки ефективного функціонування технологічного процесу поглиблення свердловини, її будівництва служать показники буріння, які забезпечує виконання основних критеріїв надійності процесу:

імовірність отримання показників буріння згідно з геолого-технологічним нарядом (ГТН) $F_k(t)$;

імовірність виконання завдання по проходці за рейс $F_n(t)$; затрати на спускопідіймальні операції (СПО) та інші допоміжні операції відповідно до норм $C_{дп}$;

коефіцієнт ефективності за механічною швидкістю:

$$V_k = \frac{v_{гтн}}{v_{факт}},$$

де $v_{гтн}$, $v_{факт}$ – відповідно нормативний і фактичні рівні механічної швидкості для конкретного геологічного розрізу;

коефіцієнт ефективності по проходці на долото:

$$Y_k = \frac{h_{гтн}}{h_{факт}},$$

де $h_{гтн}$, $h_{факт}$ – відповідно нормативна і фактична проходка на долото.

Визначення критеріїв $F_k(t)$ і $F_n(t)$ потребує спеціальних досліджень, які характеризують надійність допоміжних робіт, пов'язаних із СПО, заміною долота, компонуванням низу бурильної колони (КНБК) тощо.

Основні поняття, що характеризують надійність технологічного процесу спорудження свердловини і потребують збереження його надійності (надійність за термінами його будівництва), – це надійність за міцністю і зносом вузлів та елементів колони; граничний стан елементів колони, при якому значення окремих параметрів процесу поглиблення вибою знаходяться за межами встановлених вимог; стан колони і технологічного процесу буріння; відмова процесу буріння, що характеризується порушенням його працездатності з технологічних причин або у зв'язку з аварійністю. Усі ці поняття пов'язані з геолого-технічними умовами буріння.

У процесі буріння змінюються не тільки геометричні характеристики елементів бурильної колони, а також їх структура, властивості та напружений стан. Ці зміни можуть носити монотонний або різко виражений характер. Спочатку це стосується опори шарошкового долота, особливо з кульковими підшипниками. Характер змін в опорах кочення долота значною мірою залежить від роду тертя, умов механічного навантаження, рецептури проми-

вальної рідини, складу твердої фази в рідині і властивостей матеріалу деталей, а також фізико-механічних властивостей порід, які розбурюються.

Якісні й кількісні дослідження відпрацювання шарошкових доліт у процесі буріння в різних геологічних умовах дали змогу встановити, що інтенсивність руйнування елементів опор визначається трьома групами факторів: зовнішніми динамічними впливами як із боку динамічно збудженої бурильної колонії, так і з боку вибою, зовнішнім середовищем і властивостями поверхневих шарів тертя матеріалів. Долото в процесі буріння можна уявити як сукупність кінематичних пар тертя, на які діють динамічні навантаження. Режим навантаження долота характеризується визначенням спектром навантажень. Нестационарність навантаження долота пов'язана з двома основними причинами:

ступеневим характером навантаження під час подачі інструменту і плавністю його реалізації між двома подачами;

різними коливальними процесами бурильного інструменту.

У цьому разі головними факторами, що визначають перебіг процесу тертя і спрацювання матеріалу в кінематичних парах, є зовнішні кінематичні впливи, нормальні тиски, швидкість відносного ковзання тощо.

Динамічні впливи на кінематичні пари долота визначаються режимами буріння, а інтенсивність цих впливів, у свою чергу, компонуванням низу бурильної колонії і механічними властивостями розбурюваних порід. Разом із тим частота обертання долота визначає швидкість ковзання: збільшення призводить до інтенсивнішого руйнування поверхонь.

У роботі [2] автори роблять висновок про те, що сили тертя є не функцією нормального навантаження P , а функцією процесів, що виникають у разі того чи іншого їх сполучення нормального навантаження P , швидкості ковзання v і вектора параметрів тертя \overline{C} (матеріалів, умов середовища тощо). У загальному випадку сили тертя і нормальне навантаження в умовах механічного, теплового і матеріального контакту поверхонь тертя і середовища зв'язані деяким оператором ω :

$$T(P) = \omega(P, v, \overline{C}). \quad (1)$$

Вищеописане можна сформулювати так: сили тертя є функцією не осьового навантаження (у верхній її части-

ні – розтягу), а тих процесів, що виникають у разі того чи іншого сполучення, – швидкості обертання долота під час буріння вибійним двигуном чи ротора (обертання всієї колонії), умов промивання свердловини, геолого-технічних умов буріння. Усе це впливає на роботу механічної системи бурильної колонії. При цьому сили тертя можуть змінюватися в широкому діапазоні – залежно від протікання провідного процесу. Запишемо залежність для сили тертя в параметрах буріння свердловини:

$$T(P) = \omega(P_{oc}, n, \Gamma_{ум}, \overline{C}), \quad (2)$$

де P_{oc} – осьове навантаження на долото; n – частота обертання долота; $\Gamma_{ум}$ – геолого-технічні умови; \overline{C} – вплив промивальної рідини, її абразивність тощо.

Використаємо модель «слабкої ланки» [3], яка являє собою систему послідовно з'єднаних елементів (бурильних труб, ОБТ, долота та ін.) У такій моделі у разі відмови одного елемента (в основному долота) із ладу виходить увесь ланцюг, що призводить до необхідності підйому колонії для заміни долота (процес буріння відсутній). Це дає можливість розглянути надійність долота окремо, але з урахуванням впливу динаміки колонії на долото. З огляду на те, що долото, як правило, працює в абразивному середовищі, необхідно звернути увагу на вихід з ладу через абразивний знос його опор кочення. Абразивний знос і пошкодження – це процес основного руйнування деталей підшипників і опор, обумовлений абразивним середовищем у зонах тертя.

Наявність абразиву в зоні контакту зумовлює значну локальну концентрацію навантажень під час пластичних деформацій. Процес пластичної деформації зростає зі зменшенням розмірів твердих частинок абразиву, а також зі збільшенням змінних навантажень. Меншою мірою процес абразивного зносу супроводжується мікрорізнанням із утворенням стружки. Нормальне механічне спрацювання за тертя кочення залежить від нормального навантаження і відносного переміщення. Із досягненням певних значень нормального тиску починають розвиватися пошкодження від втоми. З подальшим збільшенням навантаження починається змінання з мікроушкодженням поверхні контакту. Слід зазначити, що абразивні частки, які є в промивальній рідині, можуть бути як загостреними, так і у вигляді заокруглених зерен. Перевага тих або інших залежить від фізико-механічних властивостей розбурюваних порід, режимів буріння та ступеня очищення вибою.



Рис. 5. Осцилограми зміни сили тертя в часі, отримані за різних швидкостей ковзання $\mu = f(v)$: а – стаціонарна ділянка; б – скріплювання другого роду; в – скріплювання першого роду

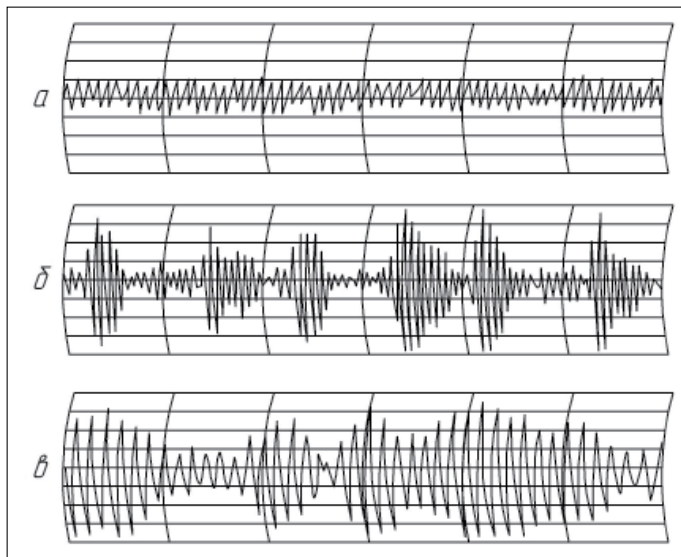


Рис. 6. Віброграма віброшвидкості динамічної складової верху бурильної колони під час буріння турбобуром А9Ш (вибій 1200 м, $P_{oc} = 150$ кН): а – 0–30 Гц; б – 30–70 Гц; в – 70–ВК Гц

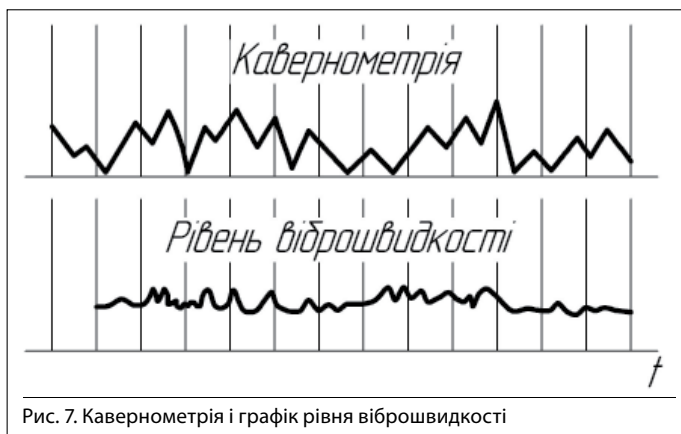


Рис. 7. Кавернометрія і графік рівня віброшвидкості

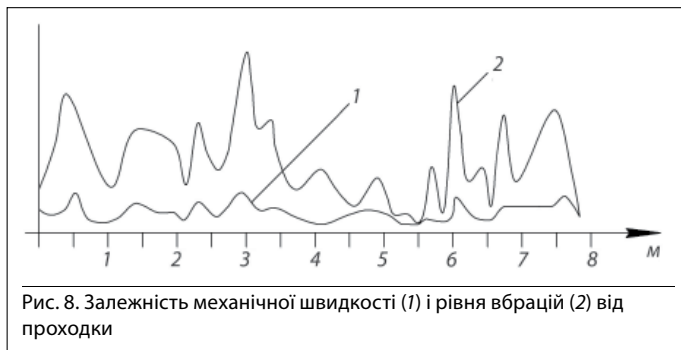


Рис. 8. Залежність механічної швидкості (1) і рівня вібрації (2) від проходки

У нашому випадку теорію тертя [4] недоречно використовувати з таких причин: існують труднощі прямого спостереження дослідження роботи опори; нетривіальність схеми напружено-деформованого стану та механізмів руйнування; термодинамічна нерівновага навантажених об'ємів поверхневих шарів; вплив промивальної рідини, яка містить абразивну тверду фазу і хімікати; робота долота пов'язана з анізотропією і чергуванням розбурюваних

порід. Для вирішення питання поведінки коефіцієнта тертя звернемося до результатів дослідів.

У роботі [2] наведено експериментальні дані вивчення залежності зміни коефіцієнта тертя від нормального навантаження $\mu = \varphi(P)$. Ця залежність має три характерні ділянки: I – стаціонарну, що відповідає нормальному режиму роботи; II – перехідну; III – із режимом пошкоджуваності. Нижче приведено осцилограми (рис. 1), отримані в роботі [2], і графік зміни коефіцієнта тертя (рис. 2). Паралельно, на рис. 3, приведено осцилограми коливань верху бурильної колони, записані за допомогою смугових фільтрів у діапазоні частот від 0 до понад 70 Гц.

Нормальний режим визначається стабільним стійким коефіцієнтом тертя. Теж саме можна сказати про віброшвидкість. Границі нормального режиму роботи визначає величина критичного тиску $P_{кр}$ як функція осевого навантаження P_{oc} . Перевищення $P_{кр}$ призводить до скріплювання та інших патологічних процесів різної інтенсивності (див. рис. 2, ділянка III). Таким чином відбувається інтенсивне коливання сил тертя (див. рис. 1, в), а також віброшвидкості (див. рис. 3), що призводить до інтенсивного зносу і як наслідок – до аварійного стану. При цьому зміна обох осцилограм є закономірною.

Залежність зміни коефіцієнта тертя від швидкості ковзання внутрішніх пар тертя в долоті має також три ділянки (рис. 4): I – патологічну, пов'язану із приробкою долота ($0 < v < v'_{кр}$); II – нормального режиму ($v'_{кр} < v < v''_{кр}$); III – патологічних процесів, що розвиваються під час скріплювання другого роду ($v \geq v''_{кр}$). Ділянка нормального режиму, яка характеризується стійким значенням коефіцієнта тертя і допустимим зносом, знаходиться між швидкостями ковзання $v'_{кр}$ і $v''_{кр}$.

У разі нормальної роботи долота коефіцієнт тертя визначають за параметрами тертя, матеріалами та їх технологічною обробкою, розмірами з'єднань, типом і властивістю змащення. Комплексний вплив цих параметрів призводить до зміни значень функцій $\mu = \varphi(P)$; $\mu = f(v)$. Отже, зі зміною стану долота змінюється вібростан бурильної колони. Зміна осевого навантаження або частоти обертання долота зумовлює зміну сил тертя у внутрішніх кінематичних парах долота, що у свою чергу призводить до зміни вібростану бурильної колони.

Для наглядної інтерпретації подібності осцилограм сили тертя в часі (рис. 5) із швидкостями ковзання, які відповідають залежності $\mu = f(v)$, приводимо віброграми запису відrobки тришарошкового долота за одне довбання (рис. 6).

Очевидно, що представлені осцилограми дуже подібні і можуть бути використані під час контролю буріння шарошковими долотами, при цьому виникає необхідність урахувувати залежність віброшвидкості від твердості порід (рис. 7).

Відомо [4], що частотний діапазон сигналу, який вимірюється на поверхні, знаходиться у межах від 0,5 до 500 Гц і більше. Його можна розділити на чотири піддіапазони: I – від 0,5 до 30–40 Гц – характеризується хвилеподібністю вибою, поперечними коливаннями елементів бурильної колони, які трансформуються в позовжні коливання

вертлюга; II – від 40 до 250–300 Гц – характеризується відносною твердістю порід і зносом озброєння долота; III – від 300 до 500 Гц – характеризує роботу опор кочення; IV – більше 500 Гц – виникають гідродинамічні шуми, взаємодія елементів колони зі стінками свердловини. Інтервали частотних піддіапазонів будуть залежати від режимів буріння, вибійних двигунів та типів доліт, які застосовують у ході буріння.

У ході експериментальних досліджень на бурових Прикарпаття отримано рівні вібрацій і механічної швидкості проходки. При цьому стало відомо, що за шарошкового озброєння долота динамічні навантаження від вибою навантажують і деформують передусім елементи опори, чому сприяє тертя і робота в абразивному середовищі, а це в свою чергу пов'язано з фізико-механічними властивостями породи, яка розбурюється. Буріння у м'яких породах супроводжується інтенсивнішим зближенням поверхонь тертя долота і стінки свердловини, що збільшує сили тертя і спричинює збільшення амплітуди коливань долота на низьких частотах. Із переходом у твердішу породу амплітуди коливань знижуються зі збільшенням частоти низько-частотних коливань – коефіцієнт тертя зменшується. Цей висновок зроблено для незмінного компонування низу бурильної колони і сталих режимів буріння. Залежність механічної швидкості і рівня вібрацій від проходки представлено на рис. 8. Між наведеними залежностями можемо помітити кореляційний зв'язок.

За результатами проведених експериментів встановлено, що у разі буріння в однорідних породах із застосуван-

ням подібних КНБК та сталих режимах буріння для певної конструкції долота сили тертя за відсутності осьового люфта шарошок залишаються сталими.

Отже, аналіз зміни віброшвидкості у вищеописаних частотних діапазонах може служити діагностичним фактором для визначення стану опори долота в процесі буріння, її ресурсу та надійності в конкретних геолого-технічних умовах. Подальша розробка методики діагностування пов'язана з дослідженням зносу опори долота, а також впливу не тільки режимних параметрів буріння, але й динаміки конструкції бурильної колони в конкретних геолого-технічних умовах. Важливу роль у питанні зносу опори відіграють режим промивання свердловини, рецептура промивальної рідини, розробка спеціальної комплексної апаратури.

Список літератури

1. **Мазур И.И.** Конструктивная надежность и экологическая безопасность трубопроводов / И. И. Мазур, О.М. Иванов, О.И. Молдаванов. – М.: Недра, 1990. – 262 с.
2. **Костецкий Б.И.** Надежность и долговечность машин / Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский, Л.И. Бершадский, А.К. Караулов. – К.: Техніка, 1975. – 406 с.
3. **Капур К.** Надежность и проектирование систем / К. Капур, Л. Ламберсон. – М.: Мир, 1980. – 604 с.
4. **Огородников П.И.** К вопросу виброакустического определения свойств разбуриваемых пород / П.И. Огородников, А.Н. Снарский, И.Ю. Вронский [и др.]. // Изв. вузов. Нефть и газ. – 1977. – № 4. – С. 23–26.

НОВИНИ

Газпром дав «зелене світло» заводу ЗПГ у Владивостоці

Керівництво ВАТ «Газпром» схвалило інвестиційну пропозицію щодо спорудження заводу зі зрідження природного газу неподалік Владивостока. Завод матиме три технологічні лінії, кожна з яких річною потужністю у 5 млн т зрідженого природного газу. Очікується, що перша черга заводу стане до ладу в 2018 р. Газ надходитиме з морських родовищ Сахаліну, а також із Якутії та Іркутської області. Покупцями цього газу стануть країни Азійсько-Тихоокеанського регіону.

Pipeline & Gas Journal / April 2013, p. 4

Нове велике газове родовище в Катарі

Як стало відомо з офіційних джерел Катару, після інтенсивних розвідувальних робіт протягом останніх чотирьох років, включаючи буріння двох розвідувальних свердловин, у межах блока – 4N відкрито нове газове родовище. Партнерами катарської компанії Qatar Petroleum виступили компанії Wintershall та Mitsui.

Початкові запаси газу на родовищі оцінюються на рівні 140 млрд м³.

Pipeline & Gas Journal / April 2013, p. 14

У Японії розпочали видобування метану з газогідратних покладів

За повідомленням з Японії, минулого місяця тут почали видобування газу з морських покладів гідратів метану, що, на думку провідних експертів, може привести до розвитку цього багатобіччючого джерела енергії. Вважається, що тут уперше у світі здійснено вилучення газу з морських газогідратів. Експерти оцінюють, що запаси вуглецю в газогідратах щонайменше удвічі більші, ніж усіх інших викопних палив у сукупності.

Pipeline & Gas Journal / April 2013, p. 14